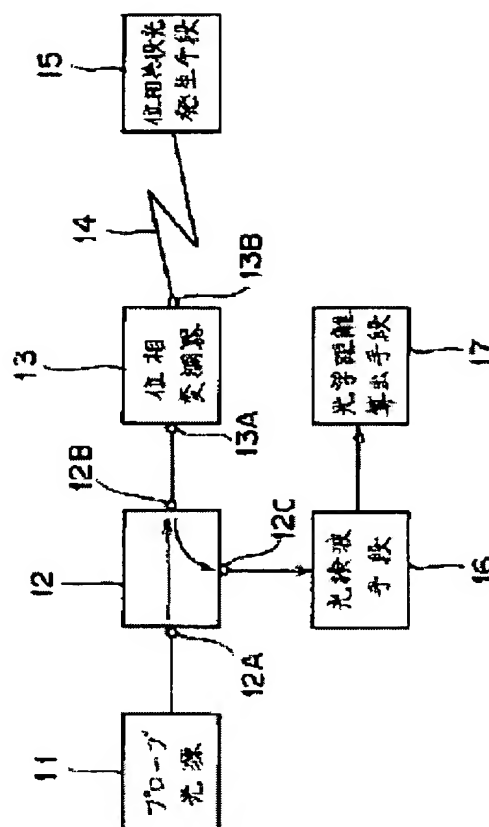


# METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING OPTICAL DISTANCE USING PHASE CONJUGATE LIGHT

**Patent number:** JP6075049  
**Publication date:** 1994-03-18  
**Inventor:** WATANABE SHIGEKI  
**Applicant:** FUJITSU LTD  
**Classification:**  
 - international: G01S17/32; G01C3/06  
 - european:  
**Application number:** JP19920228527 19920827  
**Priority number(s):** JP19920228527 19920827

## Abstract of JP6075049

**PURPOSE:** To allow highly accurate measurement of optical distance which is not susceptible to phase fluctuation by subjecting a probe light having constant frequency to phase modulation at a first point, delivering the modulated probe light toward a second point, generating a phase conjugate light at the second point, and then subjecting the phase conjugate light to phase modulation at the first point. **CONSTITUTION:** A probe light source 11 produces a probe light of constant frequency. An optical branching circuit 12 receives the probe light at an input port 12a and outputs the probe light from an I/O port 12B while furthermore receives a light at the I/O port 12B and outputs the light from an output port 12C. A phase modulator 13 subjects the lights, received at first and second ports 13A, 13B, to phase modulation and outputs the modulated lights, respectively, from the second and first ports 13B, 13A. A phase conjugate light generating means 15 disposed at a second end of an optical path 14 generates a phase conjugate light of received light. An optical detecting means 16 connected with the output port 12C of the optical branching circuit 12 detects the received light. An optical distance calculating means 17 calculates the optical distance of the optical path 14 based on the modulation index in the phase modulation of a signal detected through the optical detecting means 16.



Best Available Copy

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-75049

(43)公開日 平成 6 年(1994) 3 月18日

(51)Int.Cl. <sup>5</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 S 17/32		4240-5 J		
G 0 1 C 3/06	Z	9008-2 F		

審査請求 未請求 請求項の数18(全 16 頁)

(21)出願番号 特願平4-228527

(22)出願日 平成 4 年(1992) 8 月27日

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地

(72)発明者 渡辺 茂樹

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地

富士通株式会社内

(74)代理人 弁理士 松本 昂

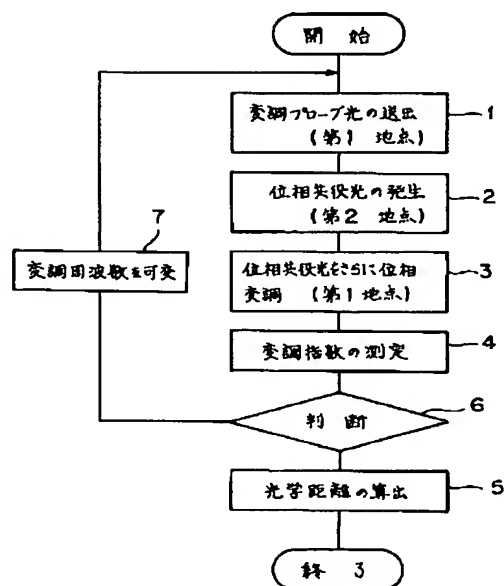
(54)【発明の名称】 位相共役光を用いた光学距離の測定方法及び装置

(57)【要約】

【目的】本発明は位相共役光を用いた光学距離の測定方法及び装置に関し、原理的には位相ゆらぎの影響を受けない高精度な測定を可能にすることを目的とする。

【構成】一定周波数のプローブ光を第1地点で位相変調して得られた変調プローブ光を、第1地点から第2地点に向けて送出し(1)、第2地点で受けた変調プローブ光に基づき位相共役光を発生させ(2)、この位相共役光を第1地点でさらに位相変調し(3)、位相変調の変調指数を測定し(4)、変調指数に基づき第1地点と第2地点の間に設定された光路の光学距離を得る(5)。

本発明方法を説明する次のフローチャート



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 第 1 地点と第 2 地点の間に設定された光路の光学距離を測定する方法であって、

一定周波数のプローブ光を上記第 1 地点で位相変調して得られた変調プローブ光を、上記光路により上記第 1 地点から上記第 2 地点に向けて送出する第 1 のステップ (1) と、

上記第 2 地点で受けた変調プローブ光に基づき該変調プローブ光に対する位相共役光を発生させ、該位相共役光を上記光路により上記第 2 地点から上記第 1 地点に向けて送出する第 2 のステップ (2) と、

該位相共役光を上記第 1 地点でさらに位相変調する第 3 のステップ (3) と、

この位相変調された位相共役光を光検波して位相変調の変調指数を測定する第 4 のステップ (4) と、

該変調指数に基づき上記光路の光学距離を得る第 5 のステップ (5) とを含むことを特徴とする光学距離の測定方法。

【請求項 2】 上記位相共役光は 3 次の非線形光学媒質における 4 光波混合により発生することを特徴とする請求項 1 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 3】 上記第 1 及び第 3 のステップにおける位相変調は、上記プローブ光と上記位相共役光が互いに逆の方向に通過する 1 台の位相変調器によりなされ、

該位相変調器に供給される変調信号は正弦波信号であり、

該位相変調器の変調周波数を測定するステップをさらに含むことを特徴とする請求項 1 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 4】 上記第 1 乃至第 4 のステップは上記変調周波数を異ならせて複数回繰り返され、

上記第 5 のステップは、上記変調指数の複数の測定値と上記変調周波数の複数の測定値の関係を求めるステップと、該関係に基づき上記変調指数の極小値を与える変調周波数の特定値を求めるステップとを含むことを特徴とする請求項 3 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 5】 上記特定値は少なくとも 2 つ求められ、上記第 5 のステップは該少なくとも 2 つの特定値の周波数間隔を求めるステップをさらに含むことを特徴とする請求項 4 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 6】 上記特定値は少なくとも 2 つ求められ、上記第 5 のステップは、当該特定値が上記少なくとも 2 つの特定値のうちの最小のものから何番目に相当するのかを求めるステップをさらに含むことを特徴とする請求項 4 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 7】 上記位相変調器を上記光路又は該光路の延長路に沿って既知の光学距離だけ変位させるステップをさらに含むことを特徴とする請求項 4 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 8】 上記光路は既知の屈折率を有する光学媒

質からなり、

上記第 5 のステップで得られた光学距離と上記既知の屈折率に基づき上記第 1 地点と上記第 2 地点の間の上記光路に沿った距離を算出するステップをさらに含むことを特徴とする請求項 3 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 9】 上記第 1 地点と上記第 2 地点の間の上記光路に沿った距離は既知であり、

上記第 5 のステップで得られた光学距離と上記既知の距離に基づき上記光路を形成している光学媒質の平均屈折率を算出するステップをさらに含むことを特徴とする請求項 3 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 10】 上記変調指数の微小変化に基づき上記光路の光学距離の微小変化を算出するステップをさらに含むことを特徴とする請求項 3 に記載の光学距離の測定方法。

【請求項 11】 一定周波数のプローブ光を出力するプローブ光源 (11) と、

該プローブ光源 (11) に接続された入力ポート (12A) と入力／出力ポート (12B) と出力ポート (12C) とを有し、該入力ポート (12A) に供給された光を該入力／出力ポート (12B) から出力し、該入力／出力ポート (12B) に供給された光を該出力ポート (12C) から出力する光分岐回路 (12) と、

該光分岐回路 (12) の入力／出力ポート (12B) に接続された第 1 ポート (13A) と光学距離を測定すべき光路 (14) の第 1 端に配置された第 2 ポート (13B) とを有し、該第 1 ポート (13A) 及び該第 2 ポート (13B) に供給された光を位相変調してそれぞれ該第 2 ポート (13B) 及び該第 1 ポート (13A) から出力する位相変調器 (13) と、

上記光路 (14) の第 2 端に配置され、受けた光に対する位相共役光を発生させる位相共役光発生手段 (15) と、

上記光分岐回路 (12) の出力ポート (12C) に接続され、受けた光を光検波する光検波手段 (16) と、

該光検波手段 (16) からの検波信号における位相変調の変調指数に基づき上記光路 (14) の光学距離を算出する光学距離算出手段 (17) とを備えたことを特徴とする光学距離の測定装置。

【請求項 12】 上記光路は均質媒体内に設定され、上記位相変調器の第 2 ポートと被測定物体の間の距離が測定されることを特徴とする請求項 11 に記載の光学距離の測定装置。

【請求項 13】 上記位相共役光発生手段は上記被測定物体に固定されることを特徴とする請求項 12 に記載の光学距離の測定装置。

【請求項 14】 上記被測定物体は上記位相共役光発生手段であることを特徴とする請求項 12 に記載の光学距離の測定装置。

【請求項 15】 上記位相共役光発生手段は、3 次の非線形光学効果を呈する光学媒質 (61) と、周波数が等しい第 1 及び第 2 の励起光を互いに異なる向きで上記光学媒

質(61)に入射させる手段とを含み、  
上記光学媒質(61)においては、上記光路を介して供給された光と上記第1及び第2の励起光と出力アイドラ光とに基づく4光波混合が生じ、

上記アイドラ光が上記位相共役光として上記光学媒質(61)から上記光路に送出されることを特徴とする請求項11に記載の光学距離の測定装置。

【請求項16】 上記光検波手段は、  
上記光分岐手段の出力ポートからの光を光／電気変換する受光器(28)と、  
該受光器(28)からの信号を増幅する増幅器(29)と、  
該増幅器(29)からの信号が供給され、上記位相共役光におけるメインピークの中心周波数と位相変調によるサイドピークの中心周波数の差に相当する周波数成分を通過させる帯域通過フィルタ(30)とを含むことを特徴とする請求項11に記載の光学距離の測定装置。

【請求項17】 上記光検波手段は、  
予め定められた周波数のローカル光を出力するローカル光源(42)と、  
該ローカル光源(42)からのローカル光と上記光分岐手段の出力ポートからの光を混合して出力する混合手段と、  
該混合手段からの光を光／電気変換する受光器(44)と、  
該受光器(44)からの信号を増幅する増幅器(45)と、  
該増幅器(45)からの信号が供給され、上記位相共役光における位相変調によるサイドピークの中心周波数と上記ローカル光の周波数の差に相当する周波数成分を通過させる帯域通過フィルタ(46)とを含むことを特徴とする請求項11に記載の光学距離の測定装置。

【請求項18】 上記光検波手段は、  
予め定められた周波数のローカル光を出力するローカル光源(52)と、  
該ローカル光源(52)からのローカル光と上記光分岐手段の出力ポートからの光を混合すると共に第1及び第2分岐光に分岐して出力する混合／分岐手段と、  
該混合／分岐手段からの第1及び第2分岐光をそれぞれ光／電気変換する第1及び第2の受光器(54, 55)と、  
該第1及び第2の受光器(54, 55)からの信号について減算を行う減算手段と、  
該減算手段からの信号を増幅する増幅器(57)と、  
該増幅器(57)からの信号が供給され、上記位相共役光における位相変調によるサイドピークの中心周波数と上記ローカル光の周波数の差に相当する周波数成分を通過させる帯域通過フィルタ(58)とを含むことを特徴とする請求項11に記載の光学距離の測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】 (目次)

産業上の利用分野

従来の技術

発明が解決しようとする課題

課題を解決するための手段

作用

実施例

発明の効果

【0002】

【産業上の利用分野】 本発明は位相共役光を用いた光学距離の測定方法及び測定装置に関する。近年、スペクトル線幅が極めて狭い光源が実用化されたことや高性能な光検波技術が開発されたことにより、光の波動としての性質を利用した各種センサが提案されている。中でも、光の位相検出を用いた光学距離（ある2地点間に光路が設定されたときのその2地点間における光路の長さと屈折率の積）の測定方法は、非接触で且つ高精度な測定方法として有用である。この種の光学距離の測定方法においては、周囲の環境変化等に起因する位相ゆらぎの影響を受けにくくして、さらに測定精度を向上させることが要望されている。

【0003】

【従来の技術】 従来、コヒーレント光の位相検出を用いた光学距離の測定システムが知られている。このシステムが既知の屈折率の光学媒体（例えば所定密度の空気）内に置かれた測定装置と被測定物体の間の距離を測定するものである場合には、光が測定装置と被測定物体の間を往復するのに要する時間や往復による位相変化を高精度に計測することができるので、これに基づき高精度な距離の測定が可能になる。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】 従来の光学距離の測定方法においては、測定装置と被測定物体の間を往復する光に周囲の環境変化等に起因する位相ゆらぎが生じた場合、この位相ゆらぎが累積して測定精度が制限されるという問題がある。

【0005】 本発明の目的は、原理的には位相ゆらぎの影響を受けない高精度な測定が可能な光学距離の測定方法及び測定装置を提供することである。

【0006】

【課題を解決するための手段】 図1は本発明方法を説明するためのフローチャートである。本発明の位相共役光を用いた光学距離の測定方法は、第1地点と第2地点の間に設定された光路の光学距離を測定する方法であって、一定周波数のプローブ光を上記第1地点で位相変調して得られた変調プローブ光を、上記光路により上記第1地点から上記第2地点に向けて送出する第1のステップ1と、上記第2地点で受けた変調プローブ光に基づき該変調プローブ光に対する位相共役光を発生させ、該位相共役光を上記光路により上記第2地点から上記第1地点に向けて送出する第2のステップ2と、該位相共役光を上記第1地点でさらに位相変調する第3のステップ3と、この位相変調された位相共役光を光検波して位相変調の変調指数を測定する第4のステップ4と、該変調指数に基づき上記光路の光学距離を得る第5のステップ5

とを含む。

【0007】位相共役光は3次の非線形光学媒質における4光波混合により発生させることができる。望ましくは、第1のステップ1及び第3のステップ3における位相変調は、プローブ光と位相共役光が互いに逆の方向に通過する1台の位相変調器によりなされ、この位相変調器に供給される変調信号は正弦波信号であり、この位相変調器の変調周波数を測定するステップが付加される。

【0008】さらに望ましくは、第1乃至第4のステップ1～4は、ステップ6で繰り返し回数が十分であると判断されるまで、ステップ7で変調周波数を可変して、複数回繰り返される。この場合、第5のステップ5は、変調指数の複数の測定値と変調周波数の複数の測定値の関係を求めるステップと、この関係に基づき変調指数の極小値を与える変調周波数の特定値を求めるステップとを含む。

【0009】図2は本発明装置を説明するためのブロック図である。本発明の位相共役光を用いた光学距離の測定装置は、プローブ光源11と、光分岐回路12と、位相変調器13と、位相共役光発生手段15と、光検波手段16と、光学距離算出手段17とを備えている。

【0010】プローブ光源11は、一定周波数のプローブ光を出力する。光分岐回路12は、プローブ光源11に接続された入力ポート12Aと、入力／出力ポート12Bと、出力ポート12Cとを有し、入力ポート12Aに供給された光を入力／出力ポート12Bから出力し、入力／出力ポート12Bに供給された光を出力ポート12Cから出力する。

【0011】位相変調器13は、光分岐回路12の入力／出力ポート12Bに接続された第1ポート13Aと、光学距離を測定すべき光路14の第1端に配置された第2ポート13Bとを有し、第1ポート13A及び第2ポート13Bに供給された光を位相変調してそれぞれ第2ポート13B及び第1ポート13Aから出力する。

【0012】位相共役光発生手段15は、光路14の第2端に配置され、受けた光に対する位相共役光を発生させる。光検波手段16は、光分岐回路12の出力ポート12Cに接続され、受けた光を光検波する。

【0013】光学距離算出手段17は、光検波手段16からの検波信号における位相変調の変調指数に基づき光路14の光学距離を算出する。

【0014】

【作用】図3は、図1の判断ステップ6と変調周波数可変ステップ7を含む本発明方法の実施の態様において、第5のステップ5で求められる変調指数と変調周波数の関係を表すグラフである。縦軸は変調指数、横軸は変調周波数である。

【0015】変調指数と変調周波数の関係は、変調周波数の増大に従って変調指数が周期的に変化する特性を有し、変調指数の極小値を与える変調周波数の特定値は、

変調周波数軸上で等間隔にある。

【0016】ここで、変調指数の極小値を与える変調周波数の特定値は、測定下にある光路の光学距離に依存する。従って、この変調周波数の特定値を用いて測定下にある光路の光学距離を算出することができる。

【0017】尚、図1の第4のステップ4で測定された変調指数が1回目に零（極小値）になれば、そのときの変調周波数が変調指数の極小値を与える変調周波数の特定値になるので、第1乃至第4のステップ1～4の繰り返しは不要となり、従って、本発明方法を実施する上で判断ステップ6と変調周波数可変ステップ7は必ずしも必要ではない。

【0018】本発明により光学距離を測定した場合、位相共役光における時間反転作用の結果、変調プローブ光が第1地点から第2地点に向かうときに受ける位相ゆらぎ或いは位相歪と、位相共役光が第2地点から第1地点に向かうときに受ける位相ゆらぎ或いは位相歪とが相殺されるので、極めて高精度な光学距離の測定が可能になる。

【0019】

【実施例】以下本発明の実施例を詳細に説明する。図4は本発明を距離測定器に適用した第1実施例を示す図である。

【0020】距離測定器は予め定められた地点と被測定物体の間の距離を非接触で測定する場合に使用され、本発明を距離測定器に適用する場合には、光学距離を測定すべき光路は屈折率が既知である均質媒体内に直線的に設定される。

【0021】本実施例では、図2のプローブ光源11、光分岐回路12、位相変調器13、位相共役光発生手段15、光検波手段16及び光学距離算出手段17にそれぞれ対応するレーザダイオード（LD）21、ハーフミラー22、位相変調器（PM）23、位相共役ミラー（PCM）24、光検波回路25及び演算器26が用いられている。

【0022】位相共役ミラー24は、必ずしも通常の鏡のような平板状の形状を有している必要はなく、その構成法については後述する。位相共役ミラー24は被測定物体27上に固定されており、この実施例では、位相変調器23と位相共役ミラー24の間に設定される光路の光学距離を測定することにより、被測定物体27までの距離が得られる。尚、位相共役ミラー24それ自体が被測定物体であっても良い。

【0023】光検波回路25は、ハーフミラー22で分岐された位相共役光を光／電気変換する受光器28と、受光器28からの信号を増幅する増幅器29と、増幅器29からの信号が供給される予め定められた通過帯域の帯域通過フィルタ30とを含む。受光器28は非線形な検波特性を有する例えばフォトダイオードからなる。帯域通過フィルタ30の通過帯域については後述する。

【0024】レーザダイオード21から出力されたプローブ光( $E_p$ )は、ハーフミラー22を通過しさらに位相変調器23を順方向に通過するときに位相変調を受けて変調プローブ光( $E_p'$ )になる。位相共役ミラー24は変調プローブ光を受けてこの変調プローブ光に対する位相共役光( $E_c$ )を送出する。

【0025】位相共役ミラー24への変調プローブ光の入射光路と位相共役ミラー24からの位相共役光の出射光路は一致する。位相共役ミラー24から送出された位相共役光は、位相変調器23を逆方向に通過するときにさらに位相変調され、この位相変調された位相共役光

( $E_c'$ )は、ハーフミラー22で分岐されて受光器28に供給される。そして、光検波回路25から出力される検波信号に基づいて演算器26が所定の手順で演算を実行し、位相変調器23と位相共役ミラー24の間の光学距離が求められる。

【0026】いま、Z座標における $Z=0$ の位置に位相変調器23があり、 $Z=L$ の位置に位相共役ミラー24があるものとし、+Z方向に進行するプローブ光が平面波として次の式で表されるものとする。

【0027】

【数1】

【0028】ここで、 $A_p(r, t)$ は電場の複素振幅、 $r$ は空間座標ベクトル、 $\omega_p$ はプローブ光の(角)周波数、 $t$ は時間、 $k_p$ は波数ベクトルの大きさを表し、 $c$ はその直前の項の複素共役をとることを意味する。但し、波数ベクトルの大きさ $k_p$ は、光路の屈折率を

( $n$ )と、 $k_p = \omega_p n / c$ で与えられる。このとき、変調プローブ光及び位相共役光はそれぞれ次の(2)及び(3)式で表される。

【0029】

【数2】

$$E_p'(r, t) =$$

$$(1/2)A_p(r) \exp[i(\omega_p t + \Phi(t) - k_p z)] + c. c. \quad \dots (2)$$

$$E_c(r, t) =$$

$$(1/2)A_p^*(r) \exp[i(\omega_c t - \Phi(t) + k_c z)] + c. c. \quad \dots (3)$$

【0030】(2)及び(3)式において、 $\Phi(t)$ は位相変調器23での位相変調により与えられる位相項を表す。ここで、位相変調器23と位相共役ミラー24の間を光が往復するのに要する時間を $\tau$ とし、位相変調器23と位相共役ミラー24の間の物理的な距離を $L$ とすると、これらは次の式を満足する。

【0031】

【数3】

$$\tau = 2nL/c \quad \dots (4)$$

$$E_c'(r, t) =$$

$$(1/2)A_p^*(r) \exp[i(\omega_c t + \Phi(t) - \Phi(t - \tau) + k_c z)] + c. c.$$

... (5)

【0034】 $\Phi(t)$ が時間 $\tau$ の間に殆ど変動しない場合、つまり、 $\Phi(t)$ の時間変動が $1/\tau$ に比べてゆっくりである場合には、 $\Phi(t) \approx \Phi(t - \tau)$ であるから、 $E_c'$ は変調が抑圧された殆ど無変調の光になる。ここでは、 $\Phi(t)$ が常に $\Phi(t - \tau)$ に一致するとは限らないという条件の下に、 $\Phi(t)$ として、次式で与えられるような周波数 $\omega$ の余弦波を考える。

【0032】位相共役ミラー24から送出された位相共役光は、位相変調器23を通過するときに変調プローブ光における時間経過に対して時間 $\tau$ だけ遅れて位相変調を受けるので、ハーフミラー22における損失を無視すれば、受光器28に入力する位相変調された位相共役光は、次の式で表される。

【0033】

【数4】

【0035】

【数5】

【0036】ここで、 $\beta$ は位相変調の変調指数である。このとき、(5)式は次の式に書き換えられる。

【0037】

【数6】

$$E_c'(r, t) =$$

$$(1/2)A_p^*(r) \exp[i\omega_c t - i\beta' \sin[\omega(t - \tau/2)] + ik_c z] + c. c.$$

…(7)

【0038】(7)式で新たに導入されたパラメータ $\beta'$ は次式を満足するものであり、このパラメータ $\beta'$ は、光が位相変調器23を往復したときに受けた2度の位相変調における実効的変調指数に相当する。以下、この実効的変調指数を単に「変調指数」と称する。

【0039】

【数7】

【0040】ここで、(9)式で定義される基準周波数 $\omega_0$ を導入して、この基準周波数を用いて(8)式を書き変えると(10)式が得られる。

【0041】

【数8】

$$\omega_0 = 2\pi / \tau \quad \dots(9)$$

$$\beta' = 2\beta \sin[\pi \omega / \omega_0] \quad \dots(10)$$

【0042】図5は、(10)式により与えられる $|\beta'| / \beta$ と $\omega / \omega_0$ の関係を表すグラフである。図5及び(10)式から明らかなように、変調指数は、2度の位相変調により、変調周波数 $\omega$ が基準周波数 $\omega_0$ の整数倍のときに抑圧され( $\beta' = 0$ )、変調周波数 $\omega$ が基準周波数 $\omega_0$ の半整数倍のときにプローブ光に対する変調指数の2倍の値になる( $|\beta'| / \beta = 2$ )。

【0043】ここで、 $|\beta'| / \beta = 0$ となる周波数

(特定周波数)は、光が位相変調器と位相共役ミラーの間の往復するのに要する時間 $\tau$ に依存するから、この特定周波数を求めることにより、位相変調器と位相共役ミラーの間の光学距離が得られ、得られた光学距離と光路の屈折率に基づいて位相変調器から被測定物体までの物理的な距離を算出することができる。

【0044】次に、図4の受光器28に供給された位相共役光に基づき変調指数 $\beta'$ を測定する方法について説明する。図6は、受光器28に供給される位相共役光

( $E_c'$ )のスペクトルの一例を示す図である。縦軸は電力密度、横軸は周波数を表す。

【0045】受光器28に入力する位相共役光は位相変調器23における位相変調を受けているので、そのスペクトルは、メインピーク31と、位相変調によりメインピーク31の低周波数側及び高周波数側にそれぞれ出現するサイドピーク32及び33とを有している。サイドピーク32及び33は1次のサイドバンドに相当し、2次以上のサイドバンドに相当するサイドピークの図示は省略されている。

【0046】サイドピーク32及び33における電力密度は、変調周波数 $\omega$ が変化するのに従って変調指数 $\beta'$ に対応して変化する。電力密度が小さくなったサイドピークの例を符号32'及び33'で示す。

【0047】従って、サイドピーク32、33における電力密度を測定することで、変調指数 $\beta'$ を求めることができる。サイドピーク32、33における電力密度を測定するために、図4の実施例では、帯域通過フィルタ30がメインピークの中心周波数とサイドピークの中心周波数の差に相当する周波数成分を通過させるように、帯域通過フィルタ30の通過帯域が設定されている。

【0048】即ち、図6に示すように、メインピーク31の中心周波数を $f$ とし、低周波数側のサイドピーク32の中心周波数を $f - \Delta f$ とし、高周波数側のサイドピーク33の中心周波数を $f + \Delta f$ とするとときに、図4の帯域通過フィルタ30の通過帯域は、帯域通過フィルタ30が周波数 $\Delta f$ の信号を通過させるように設定される。尚、変調周波数 $\omega$ の変化が小さい場合には、 $\Delta f$ がほぼ一定であるとして通過帯域を設定することができる。

【0049】図6に示されたようなスペクトルを有する光が図4の受光器28に供給されると、受光器28の非線形な光/電気変換特性により所謂ホモダイン検波が実現され、受光器28からはメインピーク成分とサイドピーク成分に基づくビート信号が出力される。ここで、ビート信号(電気)の振幅は、メインピーク成分(光)のパワーとサイドピーク成分(光)のパワーの積の平方根に比例する。また、メインピーク成分はほぼ一定である。従って、バンドパスフィルタ30を通過したビート信号の振幅を測定することで、変調指数 $\beta'$ を求めることができる。

【0050】次に、変調指数 $\beta'$ に関する情報に基づき、図4の位相変調器23と位相共役ミラー24の間の距離がどのような手順で算出されるかについて説明する。この手順は例えば図4の演算器26で実行される。

【0051】まず、位相変調器23における変調周波数 $\omega$ を順次変化させながら、変調指数 $\beta'$ の変化を観測し、図5に示されるような $|\beta'|$ (又は $|\beta'| / \beta$ )と $\omega / \omega_0$ の関係を求める。そして、この関係に基づき、変調指数の極小値を与える変調周波数を測定する。このとき、求めようとしている距離 $L$ は次式により算出することができる。

【0052】

【数9】



$$L = \frac{c}{n} \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{c}{n} \cdot \frac{\pi}{\omega_0} = \frac{c}{n} \cdot \frac{\pi}{\omega_1/N} \quad \dots(11)$$

【0053】ここで、 $\omega_1$  は変調指数の極小値を与える変調周波数のうちの観測しているものであり、この $\omega_1$  は次式で与えられる。

【0054】

【数10】

【0055】ここで、 $N$  は自然数であり、その値は観測している変調周波数 $\omega_1$  が変調指数の極小値を与える複数の変調周波数のうちの最小のものから何番目に相当するのかを表す。

【0056】従って、基準周波数 $\omega_0$  又は $N$ の値を特定することができれば、(11)式から求めるべき距離 $L$ の値を算出することができるのである。その具体的手順として3つの方法がある。

【0057】第1の方法では、図5のグラフに沿った測定データに基づき、変調指数の極小値（複数）に対応する変調周波数を少なくとも2つ求め、この少なくとも2つの変調周波数の特定値から選択される互いに隣り合う2つの特定値の周波数間隔を求める。具体的には次の通りである。

【0058】まず、変調指数が極小値になるように変調周波数を基準周波数 $\omega_0$  の整数( $N$ )倍に設定しておき、そのときの変調周波数 $\omega_1$  を測定する。次に、変調周波数を増加方向又は減少方向に掃引すると、変調指数は一旦増加し再び極小値をとるので、そのときの変調周波数 $\omega_2$  を測定する。

【0059】ここで、変調周波数の掃引が増加方向になされている場合には、 $\omega_2$  は基準周波数 $\omega_0$  の( $N+1$ )倍の周波数に相当し、変調周波数の掃引が低下方向である場合には、 $\omega_2$  は $\omega_0$  の( $N-1$ )倍の周波数に相当する。従って、これら2つの測定値 $\omega_1$  及び $\omega_2$  の差が $\omega_0$  の値になる。基準周波数 $\omega_0$  が求めれば、その値と既知の屈折率 $n$ を(11)式に代入することによって、求めるべき距離 $L$ を算出することができる。

【0060】第2の方法では、整数 $N$ が比較的小さい値の場合に、図5に沿った測定データに基づき、観測している変調周波数 $\omega_1$  に対応する整数 $N$ の値を直接数える。つまり、変調指数の極小値を与えている観測変調周波数 $\omega_1$  が、変調指数の極小値を与える複数の変調周波数特定値のうちの最小のものから何番目に相当するのかを求めるのである。これにより(11)式における整数 $N$ が判明するので、求めるべき距離 $L$ の算出が可能になる。

【0061】第3の方法は、図4の位相変調器23を被測定物体27に近付く方向又は被測定物体27から遠ざかる方向に既知の光学距離だけ変位させるステップを含む。具体的には次の通りである。

【0062】まず、変調指数の極小値を与える変調周波

数を測定しておき( $\omega_1$ )、その後、位相変調器を変位させると、前述の観測周波数 $\omega_1$  は変調指数の極小値を与えなくなる。そこで、変調周波数を掃引して、再び変調指数の極小値を与える変調周波数 $\omega_3$  を測定する。尚、 $\omega_1$  と $\omega_3$  の間には変調指数の極小値を与える変調周波数が存在しないものとする。変位後における位相変調器の位置を表すZ座標を $-L'$  とすると、

【0063】

【数11】

$$L + L' = \frac{c}{n} \cdot \frac{\pi}{\omega_3/N} \quad \dots(13)$$

【0064】が得られるので、(11)及び(13)式より $N$ の値は次のように決定可能である。

【0065】

【数12】

$$N = \frac{nL'}{c\pi} \left( \frac{1}{\omega_3} - \frac{1}{\omega_1} \right) \quad \dots(14)$$

【0066】一例として、 $n=1$ として、1kmの距離を測定する場合を考える。この場合、基準周波数 $\omega_0$  は942.5kHzである。いま、観測周波数が約1GHzになるようにシステムが構成されており、 $N=1061$ に対する $\omega_1$  として999.99MHz が得られているものとする。ここで、位相変調器のZ方向の変位量を1mにとると、 $\omega_3$  は約998.97MHz となるから、約1.02MHz の周波数シフトを観測すればよいことになる。尚、ここで例示された周波数の値は角周波数を周波数に変換したものであることに留意されたい（以下同様）。

【0067】次に、これらの方法における測定精度について考察する。いま、変調周波数の設定が安定であるとすると、誤差要因は $\omega_1$  及び $N$ の測定精度である。まず、第1の方法においては、(11)式より、

【0068】

【数13】

$$\begin{aligned} |\Delta L| &\leq \frac{\pi c N}{n} \cdot \frac{|\Delta \omega_1|}{\omega_1^2} \\ &= L \frac{|\Delta \omega_1|}{\omega_1} \quad \dots(15) \end{aligned}$$

【0069】であるから、測定する周波数 $\omega_1$  を高くするほど測定精度が高くなることになる。例えば、 $\omega_1$  の読み取り誤差を0.1kHz とすると、

【0070】

【数14】

$$\frac{|\Delta L|}{L} \leq 10^{-7} \quad \dots (16)$$

【0071】となり、1kmの距離を0.1mmの精度で測

定可能となる。一方、第3の方法においては、(11)式より、

【0072】

【数15】

$$\begin{aligned} |\Delta L| &\leq \frac{\pi c}{n} \cdot \left( \frac{|\Delta \omega_1|}{\omega_1^2} N + \frac{|\Delta N|}{\omega_1} \right) \\ &= L \left( \frac{|\Delta \omega_1|}{\omega_1} + \frac{|\Delta N|}{N} \right) \quad \dots (17) \end{aligned}$$

【0073】となる。また、(14)式より、

【0074】

$$\begin{aligned} \frac{|\Delta N|}{N} &\leq \\ &\left( \frac{|\Delta \omega_1|}{\omega_1} + \frac{|\Delta \omega_3|}{\omega_3} \right) + \frac{|\Delta(\omega_1 - \omega_3)|}{|\omega_1 - \omega_3|} \quad \dots (18) \end{aligned}$$

【0075】を得るから、これら(17)、(18)式より $\Delta L$ の見積りが可能である。まず、明らかに測定周波数 $\omega_1$ を高くすることにより測定精度の向上が可能である。いま、前述の1kmの測定における $\omega_1$ 及び $\omega_3$ の測定誤差を0.1kHzとし、これらの2つの周波数の差の測定誤差を0.01kHzとすると、

【0076】

【数17】

$$\frac{|\Delta \omega_1|}{\omega_1} \leq 10^{-7} \quad \dots (19)$$

$$\frac{|\Delta N|}{N} \leq 9.8 \times 10^{-6} \quad \dots (20)$$

【0077】であるから、

【0078】

【数18】

$$\frac{|\Delta L|}{L} \leq 9.8 \times 10^{-6} \quad \dots (21)$$

【0079】となり、1kmの距離を約1cmの精度で測定可能になる。ここでは、Nの測定誤差でLの測定精度が決まる。この方法では、測定周波数を高くするか、或いは、 $\omega_1$ と $\omega_3$ の差を大きくすることにより、測定精度を高めることができる。 $\omega_1$ と $\omega_3$ の差を大きくするためには、位相変調器の変位量 $L'$ を大きくすればよい。

【0080】本発明の大きな特徴となる位相共役光の時間反転特性について述べておく。例えば、伝送路内で周囲の環境変化等による位相変化 $\Psi$ があったとすると、従来行われているような位相変化の検出による測定におい

て、この位相変化 $\Psi$ の影響により検出精度に影響がでる。しかしながら、本発明においては、伝送路の往復によりこの $\Psi$ を原理的には完全に抑圧することができるので、周囲の環境変化等に影響されない高精度な測定が可能である。

【0081】図4の実施例では本発明を距離測定器に適用したが、本発明は屈折率測定器にも適用可能である。即ち、物理的な距離が既知である光路において本発明を実施することにより、この光路を形成している光学媒質の平均屈折率を算出することができる。

【0082】図7に示すように、本発明を変移計に適用することもできる。この場合、変調周波数 $\omega$ は一定にしておき、距離Lの変化を測定する。いま、図7に示すように、被測定物体27に固定された位相共役ミラー24が、 $Z=L$ の位置から $Z=L+\Delta L$ に変化する場合を考える。このとき、位相変調器23と位相共役ミラー24の間の光の往復時間は、(4)式で与えられる $\tau$ から $\tau'$ に変化し、この $\tau'$ は次の式で与えられる。

【0083】

【数19】

$$\tau' = \frac{2n(L+\Delta L)}{c} = \tau + \Delta \tau \quad \dots (22)$$

$$\Delta \tau = \frac{2n\Delta L}{c} \quad \dots (23)$$

【0084】位相変調器23と位相共役ミラー24の間の光の往復時間が変化するのに伴って、変調指数 $\beta'$ も異なるものとなる。これを(8)～(10)式と(22)式から求めると次のようになる。

【0085】

【数20】

$$\begin{aligned}\beta' &= 2\beta \sin\left[\pi N \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right)\right] \\ &= 2\beta \sin\left[\pi N \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right)\right] \\ &= \pm 2\beta \sin\left[\frac{\pi N \Delta L}{L}\right] \quad \dots (24)\end{aligned}$$

【0086】ここで、複号の(+)はNが偶数のとき、(−)はNが奇数のときにそれぞれ対応する。Nの値の求め方は、本発明を距離測定器に適用した場合において述べた通りである。

【0087】(24)式から、 $\beta' / \beta$ の値を測定することにより $\Delta L / L$ の値を求められることが明らかである。従って、位相変調器23と位相共役ミラー24の間の距離が既知であれば、被測定物体27の変位 $\Delta L$ を求めることができる。最も簡単なのは $N=1$ の場合であり、この場合には(24)式は次のように変形される。

【0088】

【数21】

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{-1}{\pi} \sin^{-1}(\beta' / 2\beta) \quad \dots (25)$$

【0089】特に、 $\Delta L$ が $L$ に比べて十分小さいときには、(25)式は次式で近似される。

【0090】

【数22】

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{-1}{\pi} \cdot \frac{\beta'}{2\beta} \quad \dots (26)$$

$$i_{cm}(t) =$$

$$\frac{2\eta e}{\hbar \omega_c} (P_c P_{Lo})^{1/2} J_m(\beta') \exp[i(\omega_c - \omega_{Lo} \pm m\omega)t + i\alpha] + c. c.$$

... (27)

【0097】また、 $\eta$ は受光器の量子効率、 $e$ は電荷素量、 $P_c$ 及び $P_{Lo}$ はそれぞれ受光器が受けた位相共役光及びローカル光のパワー、 $\omega_{Lo}$ はローカル光の周波数、 $\alpha$ は位相定数を表し、 $J_m$ は $m$ 次の第1種ベッセル関数を表す。(27)式の右辺における $\pm$ の記号は、対象としている位相変調成分が高周波数側及び低周波数側のいずれの変調サイドバンドに対応しているのかを表す。

【0091】従って、 $\Delta L$ が $L$ に比べて十分小さい領域では、変調指数の変化と被測定物体の変位は比例することとなり、被測定物体の変位についての直接的なモニタリングが可能になる。

【0092】本実施例によると、被測定物体の動的な変位量を測定することができるので、例えば微小振動面の振動振幅の測定や面の凹凸の度合の測定が可能になる。図8は本発明を距離測定器に適用した第2実施例を示す図である。この実施例では、ローカル光源を備えた光検波回路を用いて、ヘテロダイン検波を可能にしている。具体的には次の通りである。

【0093】この実施例が図4の第1実施例と異なる点は、図2の光検波手段16として、図4の光検波回路25に代えて、ヘテロダイン検波用の光検波回路41を設けている点である。

【0094】光検波回路41は、予め定められた周波数のローカル光を出力するローカル光源としてのレーザダイオード42と、レーザダイオード42からのローカル光をハーフミラー22で分岐された位相変調された位相共役光に混合するハーフミラー43と、ハーフミラー43から同一光路で出力されたローカル光及び位相共役光を光/電気変換する受光器44と、受光器44からの信号を増幅する増幅器45と、増幅器45からの信号が供給される所定通過帯域の帯域通過フィルタ46とを含む。

【0095】ヘテロダイン検波により受光器44に生じる光電流において、 $m$ 次の位相変調成分 $i_{cm}(t)$ は次式で与えられる。

【0096】

【数23】

【0098】中間周波スペクトルにおいて観測されるのは、光電流の自乗に比例する量であるから、受光器が受ける位相変調されている位相共役光における1次変調成分の0次成分に対するパワー比は、次式で与えられる。

【0099】

【数24】

$$\frac{P_c^{(1)}}{P_c^{(0)}} = \frac{\overline{i_{c1}^2(t)}}{\overline{i_{c0}^2(t)}} = \frac{J_1^2(\beta')}{J_0^2(\beta')} \quad \dots (28)$$

ここで、 $\overline{i_{c1}^2(t)}$ 及び $\overline{i_{c0}^2(t)}$ は各パワーに対する光電流の

【0100】 2乗値の長時間平均を表す。従って、変調周波数 $\omega$ を変えながらこのパワー比を測定すると、図5のグラフに類似した結果が得られ、その結果から変調指数 $\beta'$ を決定し、求めるべき距離を算出することができる。

【0101】 このパワー比を効果的に得るためには、帯域通過フィルタ46が位相共役光における位相変調によるサイドピーク（望ましくは1次のもの）の中心周波数とローカル光の周波数の差に相当する周波数成分を通過させるように、帯域通過フィルタ46の通過帯域が設定される。

【0102】 位相変調の変調周波数を高く設定することにより測定精度が向上する点については前述した通りであるが、図4の第1実施例においては、変調周波数を高くすると、受光器28として広帯域な受光器を使用する必要がある。

【0103】 図8の第2実施例においては、ローカル光を用いてヘテロダイン検波を行うようにしているので、ビート周波数（ $\omega_c - \omega_{Lo}$ ）を適切に設定しておくことによって、変調周波数が高い場合であっても、受光器44として比較的広帯域な受光器を用いることなしに、変調指数を求めることができる。

【0104】 即ち、図8の第2実施例においては、位相変調の変調周波数を高くすることが受光器44の帯域によっては制限されないので、極めて高精度な光学距離の測定が可能になる。

【0105】 また、図8の第2実施例においては、ローカル光のパワーを高めることにより検出感度を高めることができるので、この実施例は光路における光損失に対して有利である。つまり、この実施例によると、プローブ光のパワーや位相共役ミラーにおける位相共役光の発生効率が制限される場合にも、長距離の測定が可能になる。

【0106】 尚、図8の第2実施例に準じて光路の屈折率や被測定物体の変位を測定するようにしてもよい。図9は本発明を距離測定器に適用した第3実施例を示す図である。この実施例では、バランス型に設けられた一対の受光器を用いてヘテロダイン検波を行い、ローカル光の強度雑音を抑圧して検出感度を高めるようにしている。具体的には次の通りである。

【0107】 図9の第3実施例においては、図8の第2実施例における光検波回路41に代えて光検波回路51が用いられている。光検波回路51は、ローカル光を出力するローカル光源としてのレーザダイオード52と、レーザダイオード52からのローカル光をハーフミラー

22で分岐された位相変調された位相共役光に混合するとともにこの混合された光を第1及び第2分岐光に分岐して出力するハーフミラー53と、ハーフミラー53からの第1及び第2分岐光をそれぞれ光／電気変換する受光器54及び55と、受光器54及び55からの信号について減算を行う減算器56と、減算器56からの信号を増幅する増幅器57と、増幅器57からの信号が供給される所定通過帯域の帯域通過フィルタ58とを含む。

【0108】 ローカル光の周波数及び帯域通過フィルタ58の通過帯域は、図8の第2実施例におけるのと同じように設定される。このような光検波回路51を用いると、ハーフミラー53における透過方向及び反射方向に対する選択的な位相反転の結果、位相共役光に基づく信号成分は減算器56で相加され、レーザダイオード52からのローカル光の強度雑音成分は減算器56で相殺され、ローカル光の強度雑音を抑圧して検出感度を高めることができる。

【0109】 ハーフミラー53に代えてファイバ融着型の光カプラ等の光方向性結合器を用いることができる。また、受光器54及び55においてそれぞれ生じる光電流を減算器56で減算処理するのではなく、一対の受光器（フォトダイオード）を直列接続し、その接続点の電位変化を増幅器57に供給するように構成してもよい。

【0110】 図10は位相共役ミラーにおける位相共役光の発生の原理を説明するための図である。位相共役光は、3次の非線形光学媒質における4光波混合により発生させることができる。具体的には次の通りである。

【0111】 位相共役ミラーは、3次の非線形光学効果を呈する光学媒質61と、周波数が等しい第1及び第2の励起光を互いに異なる向きで光学媒質61に入射させる手段とを含む。光学媒質61においては、供給された変調プローブ光と第1及び第2の励起光と出力アイドラ光に基づく4光波混合が生じる。

【0112】 そして、この4光波混合過程に関与した出力アイドラ光が位相共役光として光学媒質61から光路に送出される。さらに具体的には次の通りである。3次の非線形効果を呈する光学媒質61に第1の励起光 $E_{o1}$ と第2の励起光 $E_{o2}$ を互いに異なる向きで入射させている状態で光学媒質61に入力信号光 $E_s$ （変調プローブ光に相当）を供給すると、3次の非線形光学プロセス（具体的には第1の励起光と入力信号光により形成される空間回折格子による第2の励起光の回折）により、周波数 $\omega_s$ 、波数 $k_s$ の入力信号光 $E_s$ から、周波数 $\omega_s$ 、波数 $k_s$ の出力信号光 $E_s'$ と周波数 $\omega_I$ 、波数

$k_I$  のアイドラ光  $E_I'$  が生成される。

【0113】特に、互いに異なる向きで供給された第1及び第2の励起光が同じ周波数 ( $\omega_{00}$ ) である場合には、 $k_I = -k_S$  となるから、アイドラ光は入力信号光の入射方向と反対方向に出力され (即ち反射され)、これにより位相共役ミラーが実現される。

【0114】このとき、エネルギー保存則により次の関係が成り立つ。

$$\frac{E_S'}{(\omega_S)^{1/2}} = \cosh(gL_I) \frac{E_S}{(\omega_S)^{1/2}} - i \frac{\kappa}{|\kappa|} \sinh(gL_I) \frac{E_I^*}{(\omega_I)^{1/2}} \quad \dots (30)$$

$$\frac{E_I'^*}{(\omega_I)^{1/2}} = \cosh(gL_I) \frac{E_I^*}{(\omega_I)^{1/2}} + i \frac{\kappa^*}{|\kappa|} \sinh(gL_I) \frac{E_S}{(\omega_S)^{1/2}} \quad \dots (31)$$

【0118】ここに、

【0119】

【数27】

$$g = \kappa E_{P1} E_{P2} \quad \dots (32)$$

$$\kappa = \frac{3\omega_{00}}{2n_1c} \langle \chi^{(3)} \rangle \quad \dots (33)$$

【0120】であり、 $n_1$  及び  $\chi^{(3)}$  はそれぞれ非線形媒質の屈折率及び3次の非線形定数を表す。また、 $\langle \chi$

$$G_S = G = \cosh^2(gL_I) \quad \dots (34)$$

$$G_I = (G-1) \frac{\omega_I}{\omega_S} = (G-1) = \sinh^2(gL_I) \quad \dots (35)$$

【0122】で与えられることがわかり、4光波混合を用いた位相共役光の生成においては、信号の増幅も同時に実現されることがわかる。以上説明した実施例では、被測定物体が空間内に配置されている場合に位相変調器と被測定物体の間の光学距離を測定するようにしているが、位相変調器と位相共役ミラーの間に光ファイバ等からなる光伝送路を配置し、この光伝送路の光学距離を測定するようにしてもよい。

【0123】続いて、本発明を実施し得ることを実証する実験結果について説明する。この実証実験の結果か

【0115】

【数25】

【0116】主述の非線形光学効果の相互作用長を  $L_I$  とすれば、生成方程式は以下で与えられる。

【0117】

【数26】

$\langle \chi^{(3)} \rangle$  は非線形定数の全ての偏波状態についての平均を表す。 $E_I'$  が  $E_S$  の位相共役光であることは、(31)式において入力アイドラ光がない場合 ( $E_I = 0$ ) を考えてみれば明らかである ( $E_I'$  は  $E_S$  の複素共役関数に比例している)。また、(30)及び(31)式より信号ポート及びアイドラポートから出力される光に対するそれぞれの利得  $G_S$  及び  $G_I$  は、

【0121】

【数28】

ら、位相共役光の発生が可能であることと、ヘテロダイン検波を用いて変調サイドバンドにより変調指数  $\beta'$  を特定し得ることと、変調指数が変調周波数に応じて変化するところが明らかになる。

【0124】図11は実証実験に用いたシステムのブロック図である。この実験では、全ての光学部品はシングルモードファイバにより接続された。プローブ光  $E_P$  は  $\text{LiNbO}_3$  位相変調器 PM に到達し、ここで周波数  $\omega$  の正弦波信号により位相変調された。位相変調された  $E_P$  と励起光  $E_0$  は、概略進行波型の半導体レーザ増幅器

SLAに供給された。両者の偏光状態は、半導体レーザ増幅器SLAのTEモードになるように、 $1/2$ 波長板及び $1/4$ 波長板を備えてなる偏光制御器PC2及びPC3により制御された。

【0125】プローブ光源としてのレーザダイオードPr-LD及びポンプ光源としてのレーザダイオードPu-LDとしては、動作波長が $1552\text{nm}$ の $1/4$ 波長シフト型の3電極DFB-LDが用いられた。プローブ光と励起光の周波数差は $525\text{MHz}$ に設定され、それぞれの光パワーは $5.0 \times 10^{-4}\text{mW}$ 及び $3.2 \times 10^{-3}\text{mW}$ に設定された。

【0126】半導体レーザ増幅器は $70\text{mA}$ でバイアスされ、小信号内部利得は約 $20\text{dB}$ であった。半導体レーザ増幅器の両端の劈界面の反射率は約 $10^{-3}$ であり、従って、半導体レーザ増幅器内においては4光波混合による反射位相共役光 $E_c$ が発生した。全反射光パワーは $2.9 \times 10^{-3}\text{mW}$ であり、この値は $7.6\text{dB}$ のパワー利得に相当する。

【0127】半導体レーザ増幅器SLAからの光は位相変調器PMを再び逆方向に通過してその出力はヘテロダイン検波された。ヘテロダイン検波回路は、局発レーザダイオードL-LDとしてのもう一つの3電極型DFB-LDとバランス型受光器BORとを備えて構成された。位相変調器PMと半導体レーザ増幅器SLAの間の距離は約 $5.7\text{m}$ に設定された。プローブ光に対する位相変調の変調指数は $0.75$ に設定され、ビート信号のスペクトル線幅は約 $8\text{MHz}$ であった。

【0128】この実験では、変調周波数 $\omega$ を掃引しながら中間周波数領域で位相共役光 $E_c$ のスペクトルが観測され、主ピーク $E_c^{(0)}$ 及び低周波数側の1次のサイドバンド $E_c^{(-1)}$ のパワーが測定された。図12はパワー比 $P_c^{(-1)}/P_c^{(0)}$ と変調周波数の関係をプロットしたグラフである。ここで、 $P_c^{(-1)}$ 及び $P_c^{(0)}$ はそれぞれ $E_c^{(-1)}$ 及び $E_c^{(0)}$ の光パワーを表している。

【0129】パワー比は変調周波数 $\omega$ が増大するのに従って周期的に変化し、変調周波数 $\omega$ が $\omega_0 = 2\pi \times 18.2\text{MHz}$ の倍数に相当するときに最小となった。 $\omega_0$ の値は、 $5.7\text{m}$ のシングルモードファイバ( $n=1.45$ )の光の往復時間 $\tau$ の逆数を用いて算出された値に極めてよく一致した。

【0130】図12において実線で表される曲線は、図8の実施例における(27)及び(28)式により算出された値に基づいた理論曲線である。実測値は理論曲線によく一致している。

【0131】図13はスペクトルアナライザSAの観測結果を示す図であり、(A)は変調周波数が $50.0\text{MHz}$ ( $\omega/\omega_0 = 2.75$ )のときのスペクトルの観測結果を表し、(B)は変調周波数が $54.6\text{MHz}$ ( $\omega/\omega_0 = 3$ )のときのスペクトルの観測結果を表している。

【0132】図13(A)では、 $E_c$ 及び $E_p$ はほぼ同

等に位相変調されているが、図13(B)では、 $E_c$ のところには1つの光キャリアのみが観測されているのに対し、 $E_p$ は最大の位相変調を受けている。このことは、 $E_c$ に対しては位相ゆらぎが抑圧され、 $E_p$ に対しては往復による2度の位相変調がなされていることを表している。図13(A)及び(B)において、 $E_0$ が同等のスペクトルを有しているのは、 $E_0$ が位相変調器を1回だけ通過しているからである。

【0133】以上の実証実験の結果から、位相共役光の発生が可能であることと、ヘテロダイン検波を用いて変調サイドバンドにより変調指数 $\beta'$ を特定し得ることと、変調指数が変調周波数に応じて変化することとが明らかになった。

【0134】また、変調指数が変調周波数に応じて変化の様子と、光路における任意の位相ゆらぎが比較的長い周期の(測定で用いる変調信号の周波数より十分低い周波数の)周期関数のフーリエ級数で表すことができることを考慮すると、本発明により光学距離を測定した場合に位相ゆらぎの影響を排除して極めて高精度な測定が可能になることが明らかである。

#### 【0135】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によると、原理的には位相ゆらぎの影響を受けない高精度な測定が可能となる光学距離の測定方法及び測定装置の提供が可能になるという効果を奏する。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明方法を説明するためのフローチャートである。

【図2】本発明装置を説明するためのブロック図である。

【図3】変調指数と変調周波数の関係を表すグラフである。

【図4】本発明を距離測定器に適用した第1実施例を示す図である。

【図5】 $|\beta'/\beta|$ と $\omega/\omega_0$ の関係を表すグラフである。

【図6】図4の受光器に入力する位相共役光のスペクトルの一例を示す図である。

【図7】本発明を変移計に適用した例を示す図である。

【図8】本発明を距離測定器に適用した第2実施例を示す図である。

【図9】本発明を距離測定器に適用した第3実施例を示す図である。

【図10】位相共役光の発生の原理を説明するための図である。

【図11】実証実験に用いたシステムのブロック図である。

【図12】実証実験の結果の一部を示すグラフである。

【図13】実証実験においてスペクトルアナライザにより観測されたデータを示す図である。

【符号の説明】

- 1 1 プローブ光源
- 1 2 光分岐回路
- 1 3 位相変調器

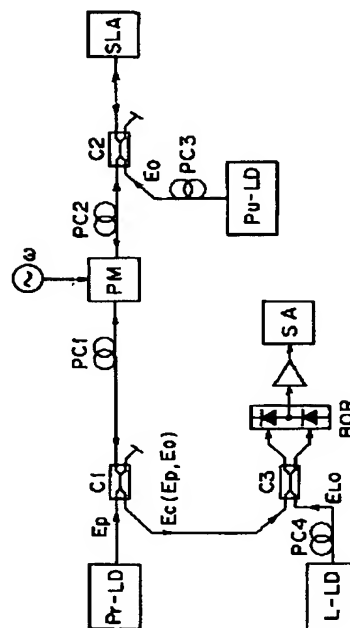
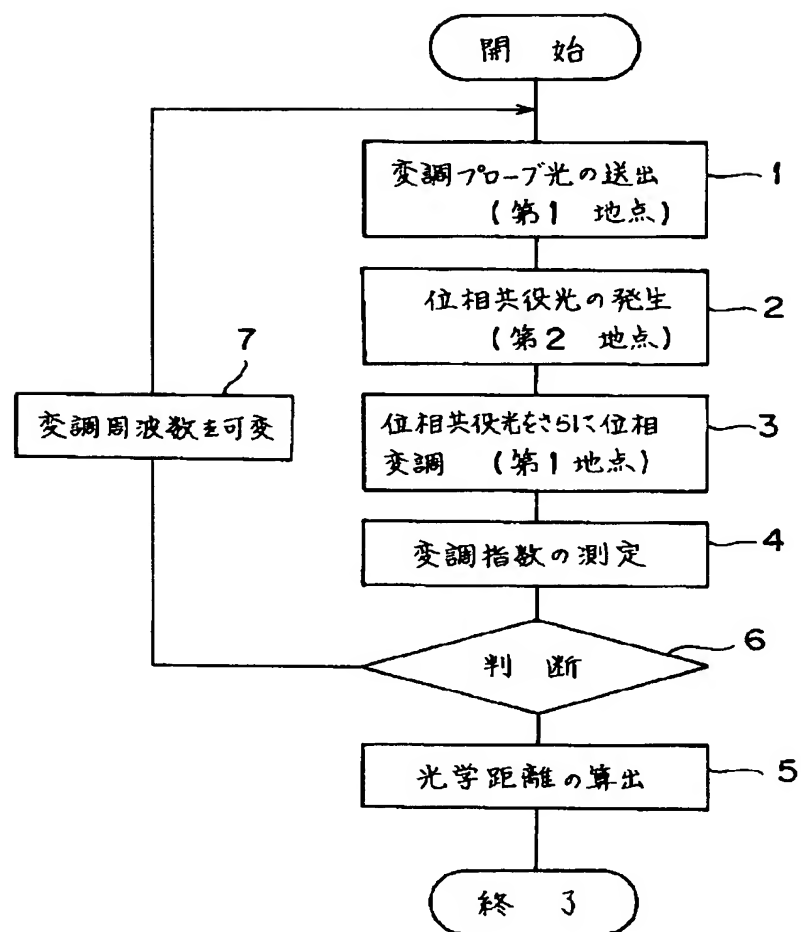
- 1 4 光路
- 1 5 位相共役光発生手段
- 1 6 光検波手段
- 1 7 光学距離算出手段

【図 1】

【図 1 1】

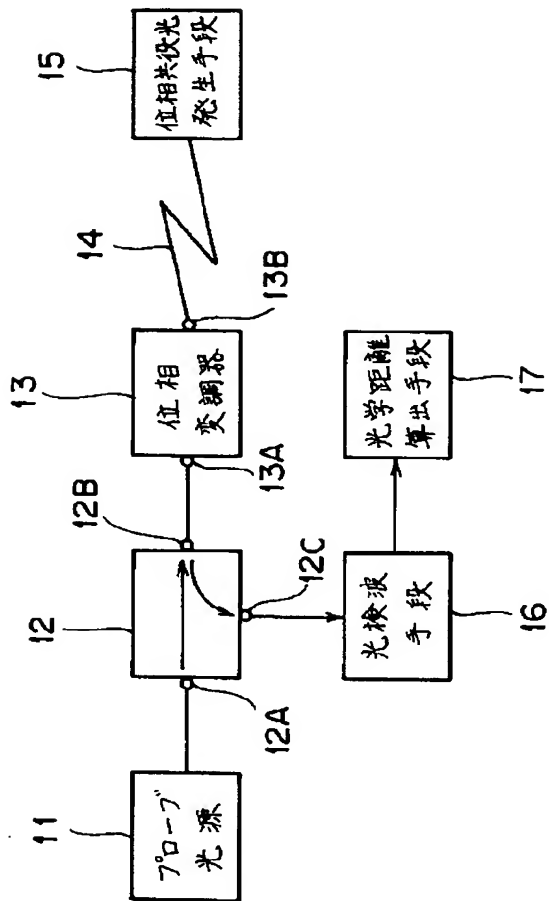
本発明方法を説明するためのフローチャート

実験実験に用いたシステムのブロック図



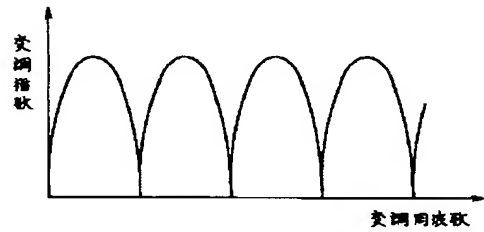
【図2】

本発明装置を説明するためのブロック図



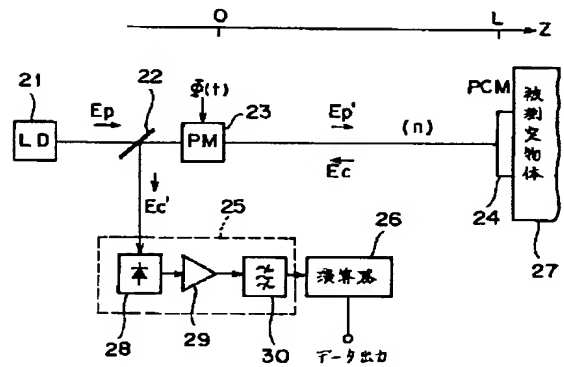
【図3】

変調指数と変調周波数の関係を表すグラフ



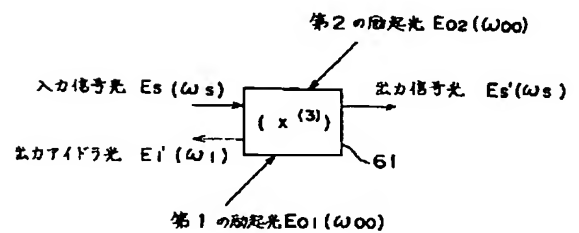
【図4】

本発明を距離測定器に適用した第1実施例を示す図



【図10】

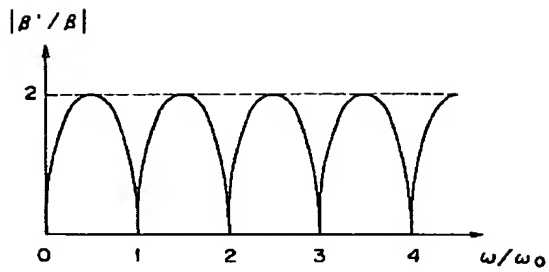
位相共役光の発生原理を説明するための図





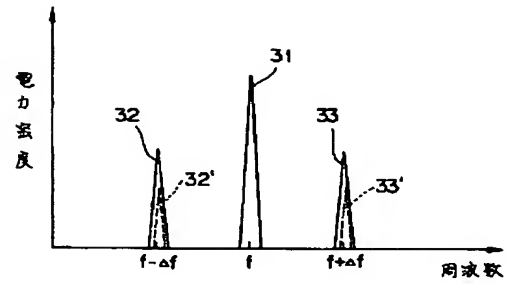
【図5】

$| \beta' / \beta |$  と  $\omega / \omega_0$  の関係を表すグラフ



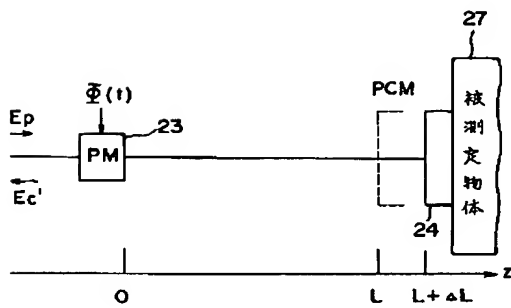
【図6】

図4の受光器に入力する位相共役光のスペクトルの一例を示す図



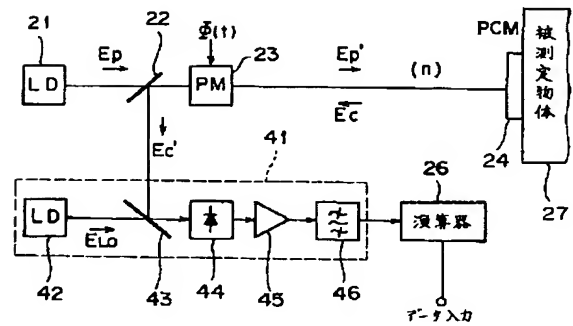
【図7】

本発明を変形計に適用した例を示す図



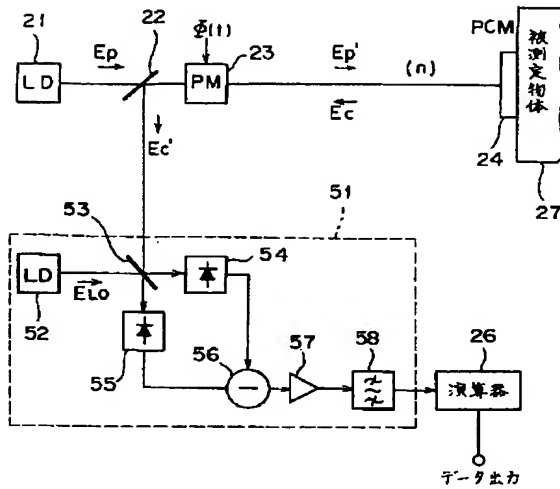
【図8】

本発明を距離測定器に適用した第2実施例を示す図



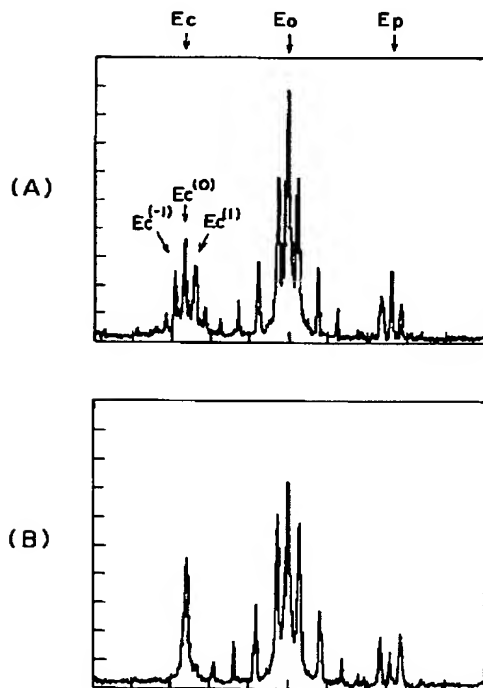
【図9】

本発明を距離測定器に適用した第3実施例を示す図



【図13】

スペクトルアナライザの観測結果を示す図



【図12】

$P_c^{(1)}/P_c^{(0)}$  と  $\omega/\omega_0$  の関係をプロットしたグラフ

